

Determination of the Resetting Time to the Process Mean Shift based on the Cpm+

Do-Kyung Lee[†]

School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

Cpm+ 기준에서의 공정평균이동에 대한 재조정 기간 결정

이 도 경[†]

금오공과대학교 산업공학부

Machines and facilities are physically or chemically degenerated by continuous usage. One of the results of this degeneration is the process mean shift. By the result of degeneration, non-conforming products and malfunction of machine occur. Therefore a periodic preventive resetting the process is necessary. This type of preventive action is called 'preventive maintenance policy.' Preventive maintenance presupposes that the preventive (resetting the process) cost is smaller than the cost of failure caused by the malfunction of machine. The process mean shift problem is a field of preventive maintenance. This field deals the interrelationship between the quality cost and the process resetting cost before machine breaks down. Quality cost is the sum of the non-conforming item cost and quality loss cost. Quality loss cost is due to the deviation between the quality characteristics from the target value. Under the process mean shift, the quality cost is increasing continuously whereas the process resetting cost is constant value. The objective function is total costs per unit wear, the decision variables are the wear limit (resetting period) and the initial process mean. Comparing the previous studies, we set the process variance as an increasing concave function and set the quality loss function as Cpm+ simultaneously. In the Cpm+, loss function has different cost coefficients according to the direction of the quality characteristics from target value. A numerical example is presented.

Keywords : Process Mean Shift, Quality Loss Function, Cpm+, Wear Limit

1. 서 론

모든 설비나 기계는 지속적인 사용으로 인해 열화한다. 열화의 형태로는 마모, 경화, 점도 그리고 저항 변화 등이 있다.

기계적 특성의 경우, 가공공정에서 제품의 특성 변화를 초래하는 형태로서 가공공구의 마모 현상, 휨 현상 그리고 공구지지대와 치구의 유격 발생에 의한 떨림현상들을 예로 들 수 있다. 이러한 현상들이 공정에 미치는 결과로

서, 마모 현상과 휨 현상은 작업물에 대한 가공 목표점으로부터의 이탈을, 떨림 현상은 제품에 대한 변동 증가를 초래한다.

설비의 열화가 심각하게 진행되면 궁극적으로 설비는 고장에 이른다. 고장이 발생하면 설비를 교환하거나 수리해야 하며, 이에 들어가는 비용을 실패비용이라 한다. 실패비용은 매우 크므로 일반적으로 고장 이전에 사전 예방조치를 취하게 되며, 여기에 들어가는 예방비용은 실패비용에 비해 상대적으로 작다. 이와 같이 실패비용과 예방비용을 동시에 고려하여 총비용이 최소가 되도록 정비시기를 정하는 것을 '예방보전'이라 한다.

본 연구의 공정평균이동(process mean shift) 문제는 예방

보전의 한 분야다. 공정평균이동 문제가 예방보전과 다른 점은 설비 고장 이전에 발생하는 제품과 관련한 비용과 공정 조정비용의 합을 최소화 하는 시기를 정한다는 것이다. 여기서 공정조정비용은 예방보전에서 실패비용에 해당한다.

설비가 고장 나지 않았더라도 연속적인 제품 생산은 설비의 열화를 유발한다. 설비의 열화 즉, 공정의 변화는 해당 설비에서 생산되는 제품에 그 결과를 반영한다. 이러한 공정 변화가 제품에 반영된 결과가 품질특성치다. 품질특성치에 의해 제품은 최종적으로 양품과 부적합품으로 구분되며, 그 판정기준은 해당 품질특성치의 규격 만족 여부다.

마모를 포함하여 열화가 진행되면, 품질특성치들의 평균은 규격의 상방향이나 하방향 중에서 어느 한 방향으로 이동하게 되는데, 이를 공정평균이동이라 한다. 공정평균이동이 진행될수록 품질특성치는 규격의 상한 혹은 하한에 가까워지게 되며 부적합품의 발생 확률이 증가한다. 그러므로 일정수준 이상의 공정평균이동이 발생하면, 부적합품의 발생을 저지하기 위해 이동된 공정평균의 되돌림 즉, 공정조정이 필요하다.

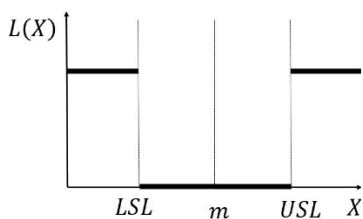
공정에서 발생하는 비용에는 앞서의 부적합품에 의한 비용 이외에 양품에 있어서의 품질비용이 있다. 품질비용은 비록 양품이지만 설계상의 공정 목표값 m 과 제품의 품질특성치 x 와의 편차에 따른 차이를 비용개념의 손실함수(loss function)로 전환한 것이다. 즉, 규격 안에 들어오는 모든 양품들을 동일하게 취급하던 기존 개념에서 벗어나, 공정 목표값과의 차이에 따라 이를 비용으로 처리하는 것이다. 손실함수 개념은 소비자의 사용적합성과 사회비용 측면에서 그 타당성이 인정되고 있다.

품질특성치 x 에 대한 다구찌의 손실함수 $L(x)$ 는 아래 식 (1)과 같으며, 기존 품질 개념과의 비교를 아래 <Figure 1>과 <Figure 2>에 나타내었다.

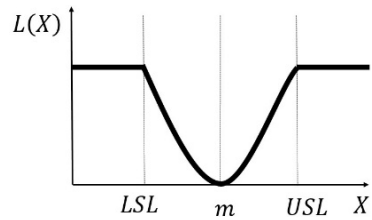
$$L(x) = k(x - m)^2 \quad (1)$$

식 (1)에서 공정 목표치 $m = (LSL + USL)/2$ 이며, k 는 공정의 특성에 해당하는 비용계수다.

USL(upper specification limit)-규격 상한
LSL(lower specification limit)-규격 하한



<Figure 1> Existing Quality Concept for x



<Figure 2> Loss Function for x

<Figure 2>에서 X 값이 공정 목표값 m 과 일치하는 경우에는 품질비용이 발생하지 않는다. X 값이 USL 이나 LSL 일 때, 손실함수 $L(X)$ 가 부적합비용과 동일할 필요는 없다. 왜냐하면, USL 과 LSL 에서의 규격 내 품질수준과 규격 외 품질수준은 동일하지만, 실제 양품과 부적합품이 판매되는 비용은 전혀 다르기 때문이다. 손실함수는 품질특성치의 성격에 따라 망목특성, 망소특성 그리고 망대특성의 세 가지가 있다. 위의 <Figure 2>는 망목특성에 해당하는 손실함수이며, 본 연구의 대상특성으로서 가장 일반적인 경우다.

제품생산 시점에서부터 공정조정까지 발생하는 총비용은 부적합품에 의한 부적합비용, 품질손실비용 그리고 공정조정비용의 세 가지 항목으로 구성된다. 본 연구의 목적함수는 단위 마모당 총비용이며, 결정변수는 목적함수를 최소화하는 공구의 마모수준과 이때의 초기공정평균이다. 공정의 재조정은 마모수준이 마모한계에 도달할 때 실시한다. 최적의 공구 마모수준 즉, 마모한계는 마모수준의 진행에 대해 증가하는 단위 마모당 부적합비용 및 품질손실비용과 감소하는 공정조정비용 간의 절속(trade-off)에 의해 결정된다. 공정평균이동 연구는 부적합품의 처리 방식과 품질비용 항목의 함수 설정에 의해 다양하게 전개되어 왔다.

다구찌의 손실함수 개념은 공정능력지수(PCI : process capability index)에서 비롯되었다. 공정능력지수는 실제 공정산포와 설계상 허용 가능한 공차를 비교한 수치이며, 허용 가능한 공정산포는 공정규격의 상한과 하한 사이의 간격이다. 공정능력지수는 해당 공정이 주어진 규격을 어느 정도로 충족하는지를 나타내는 지수로서 공정정밀도의 개념이다. 이 공정능력지수를 사용함으로써 품질에 대한 명료한 목표 설정과 의사소통을 단순화시킬 수 있기 때문에 여러 공정능력지수들이 산업계에서 폭넓게 사용되고 있다.

공정능력지수 개념은 Juran[7]이 제시했다. 그는 저서에서 품질 특성치들의 표준편차의 6배를 자연공차(natural tolerance)로 지칭하면서, 자연공차를 사용한 C_p 라는 공정능력지수를 제시했다. C_p 는 식 (2)와 같다. 이후 다양한 현장 상황을 공정능력지수에 반영하기 위한 C_{pk} , C_{pm} 그리고 $C_{pm} +$ 등의 공정능력지수들이 연구들에 의해 제시되어 왔다.

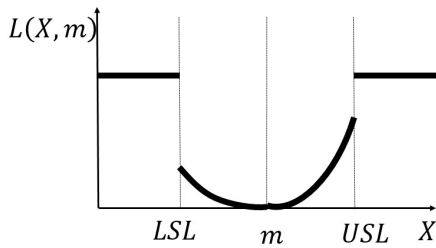
$$C_p = (USL - LSL) / 6\sigma \quad (2)$$

본 연구에서 도입하는 $C_{pm}+$ 는 품질특성치 x 와 공정 목표값 m 의 편차에 있어 미달 혹은 초과에 결과에 대해 비용계수 k 를 달리하는 손실함수를 적용하는 공정능력 지수다. $C_{pm}+$ 는 좌우 편차에 대해 동일한 비용계수를 적용하는 C_{pm} 을 일반화한 공정능력지수로서 식 (3)과 같다. 해당 지수에서 사용하는 손실함수 $L(X, m)$ 는 식 (4)와 같으며, <Figure 3>에 나타내었다.

$$C_{pm}+ = (USL - LSL) / 6 \sqrt{E[L(X, m)]} \quad (3)$$

$$L(X, m) = k_1(X - m)^2, (X \leq m) \quad (4)$$

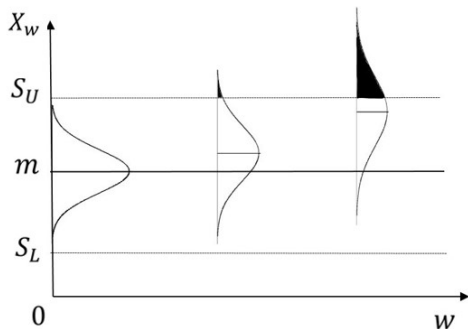
$$= k_2(X - m)^2, (X > m)$$



<Figure 3> Loss function on $C_{pm}+$

공정평균이동 문제에서 고려해야 하는 결정변수로서 마모한계 이외에 초기 공정평균 μ_I 가 있다.

마모가 전혀 없는 생산 초기에 공정평균을 설계상의 목표값 m 에 위치할 경우, 품질비용이 발생하지 않으며, 부적합률 또한 최소가 된다. 그러나 생산에 의해 마모가 진행될수록 공정평균은 규격상한이나 하한의 한쪽 방향으로 진행된다. 이 경우 마모 w 가 진행될수록 <Figure 4>에서와 같이 공정평균은 규격상한 S_U 방향으로 이동하여, 상한 규격을 초과하는(채색된 부분) 부적합률 $P(w)$ 은 기하급수적으로 증가한다.



<Figure 4> $P(w)$ with Wear Level w

그러므로 생산기간 동안 전체 부적합률을 줄이기 위해서는 초기공정평균 μ_I 를 공정평균이동이 진행되는 반대편 방향으로 m 보다 작게 설정함이 필요하다. 결과적으로 초기공정평균 μ_I 는 공정평균 조정시기(마모한계)와 함께 목적식에 영향을 주는 결정변수다.

총비용에 영향을 미치는 다른 요인으로 공정분산이 있다. 마모가 진행되면, 진동의 심화나 유격의 발생 등에 의해 공정 분산이 지속적으로 증가하며, 이 경우 부적합비용과 품질비용이 증가한다. Lee[9]는 이 점을 감안하여 공정분산을 상수가 아닌 마모에 의해 증가하는 함수로 설정함으로써 실제 절삭공정의 특성을 보다 잘 반영한 공정평균이동에 관한 연구를 발표했다.

본 연구에서는 공정평균이동으로 인해 발생하는 비용 함수에 $C_{pm}+$ 의 손실함수를 도입하고 손실함수 및 부적합률 산정에 있어 공정분산에 함수를 적용한 새로운 공정평균이동 모형을 제안하고, 모형의 최적 초기공정평균과 마모한계를 구한다.

2. 기존 연구

공정평균이동에 관한 분야는 Manuele[13]가 공구의 마모로 인한 선형이동 문제로 최초로 제기했다. 이후 Quesenberry [16], Schneider[18] 등의 초기 연구들은 마모수준을 직접 알 수 없는 경우, 생산한 제품의 품질특성치를 측정하여 간접적으로 관리도나 회귀모형을 사용하여 보전시기를 결정하는 연구들이었다.

직접적인 측정 혹은 기존 자료분석을 통하여 마모수준을 알 수 있는 경우에 대한 연구들은 다음과 같다. 부적합률을 산정하는 기준을 대상으로 한 연구들로서 한쪽 규격만 설정한 Gibra[5]의 연구와 양쪽 규격을 설정한 Kamat [8]의 연구가 있다.

비용함수에 주목한 연구들이 있으며, 비용함수 중 실패비용을 대상으로 전개한 연구들은 다음과 같다. Sule과 Harmon[20]은 실패비용 산정에 있어 정규분포에 의한 정확한 부적합률이 아닌 일반함수를 사용하였다. Springer[19]는 규격하한에 미달되는 제품과 규격상한을 초과하는 부적합품에 대해 실패비용이 각기 상이한 모델을 제시했다.

공정평균이동의 한 분야로서 ‘켄공정 문제’가 있다. 이 분야에서는 생산에 투입하는 재료가 고가라는 전제하에 하한규격 이상 투입되는 재료에 대한 비용을 모형에 추가하는 모델이다. 관련 연구로는 Golhar[6], Lee와 Bai[11] 등이 있다.

공정평균이동 문제에 손실함수를 도입한 연구로는 대구찌 손실함수와 규격상한을 적용한 Rahim과 Tuffaha[17] 연구가 있다. Bolyes[3]가 비대칭인 대구찌의 2차 손실함수

$C_{pm}+$ 를 제안한 이후, 이를 이용하여 공정이동평균 문제를 취급한 Chen[4], Makis[12] 그리고 Ahn과 Jang[1]의 연구가 있다.

생산량의 분포함수에 대한 연구로서, Lee와 Park 등[10]은 공정평균이동에 대한 생산량이 상수가 아닌 정규분포를 따르는 경우를 제시했다. Arcelus 등[2]은 공정분산이 마모 구간별로 알려진 상수로 설정한 모델을 제시했다. Lee[9]는 다구찌 손실함수를 적용하면서 공정분산이 증가하는 일반함수인 모형을 제시했다.

3. 모형의 구성

제품의 생산량 증가에 의해 설비 마모나 열화가 진행되며, 이 결과로서 공정평균이동이 발생한다.

그러므로 품질특성치 X 는 마모수준에 의해 영향을 받는다. 마모 수준을 w 로 나타낼 때, 마모수준 w 에서 생산된 제품의 품질특성치를 X_w 로 표시하기로 한다. 공정이 안정되어 있을 때, X_w 는 정규분포를 따른다. 정규분포는 평균과 분산을 매개변수로 하는 확률분포함수다.

마모수준 w 에서의 X_w 의 공정평균을 $\mu(w)$ 로 나타낼 때, $\mu(w)$ 는 아래 식 (5)와 같다.

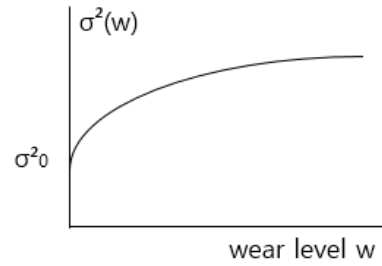
$$\mu(w) = \mu_I + w \tag{5}$$

식 (5)의 μ_I 는 단위당 총비용을 최소화하는 초기 공정평균의 설정값으로 <Figure 4>에서 그 필요성을 설명한 바 있다. μ_I 는 본 모형에서의 결정변수이며, 공정평균이동을 고려하지 않는다면, 상수인 공정 목표값 m 이 된다.

Park 등[15]은 마모에 대한 가공결과가 피삭재와 절삭공구(인서트 팁)의 상대적 강도와 회전속도, 이송속도 등에 의해 영향을 받음을 제시했다. 이 영향에는 공정분산도 포함된다. 본 연구는 마모 진행에 의해 공정의 분산이 증가하는 모형이다. X_w 의 공정분산을 $\sigma^2(w)$ 로 나타내며 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma^2(w) &= \sigma_0^2 + \alpha w^\beta, \\ \text{단 } \alpha &\geq 0, 0 \leq \beta \leq 1 \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)에서 σ_0^2 는 설비의 초기 분산 즉, 마모가 진행되기 전의 분산으로 설비의 고유 정밀도다. 마모에 의한 분산의 증가 형태를 식 (6)의 αw^β 로 설정한다. 이 때, α 는 척도모수이며, β 는 형상모수다. 이들 두 개의 모수들은 각기 대상 공정에 적용되는 고유한 상수다. 마모수준 w 와 공정분산 $\sigma^2(w)$ 의 관계를 <Figure 5>에 나타내었다.



<Figure 5> $\sigma^2(w)$ with Wear Level w

공정분산의 형상 모수 β 에 대해 $0 \leq \beta \leq 1$ 로 설정한 이유는 <Figure 5>의 $\sigma^2(w)$ 가 마모수준 w 에 대한 concave한 단조증가 함수이기 때문이다. 이 함수는 Lee[9]가 Pandit와 Wu[14]의 절삭공구의 마모 실측자료를 AM(2, 1) 모델로 분석한 결과를 따른 것이다. 그러므로 결과적으로 X_w 는 다음의 분포를 따른다.

$$\begin{aligned} X_w &\sim N(\mu_I + w, \sigma_0^2 + \alpha w^\beta) \tag{7} \\ f(X_w) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{\{X_w - (\mu_I + w)\}^2}{2(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)}\right]. \end{aligned}$$

마모 증가에 대한 본 연구의 비용 모형은 공정평균 조정으로 인한 비용 G , 부적합품의 처리비용 C_d 그리고 양품에 대한 품질비용 C_q 항목의 총합으로 구성된다.

3.1 공정평균 조정 비용

공정평균 조정 비용 G 는 설비 가동 이후 진행된 공정평균이동을 되돌리기 위한 비용이다. 재조정 기간 동안 1회의 발생비용이며, 마모수준과 무관한 상수다.

3.2 부적합 비용

부적합 비용은 조정 구간에서 생산한 제품들 중에서 부적합품으로 인해 발생하는 비용이다.

마모수준 w 에서의 제품부적합률 $P(w, \mu_I)$ 는 상한규격 S_U 및 하한규격 S_L 을 벗어난 비율의 합으로 구성되며 아래 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} P(w, \mu_I) &= 1 - \Pr(S_L \leq X_w \leq S_U) \tag{8} \\ &= 1 - \int_{S_L}^{S_U} f(X_w) dX_w \end{aligned}$$

재조정 시점의 마모수준을 마모한계 w_l 로 나타낼 때, 마모수준에 대한 $[0 \sim w_l]$ 구간 동안의 부적합률 $P(w, \mu_I)$ 의 기대값 $E[P(w_l, \mu_I)]$ 은

$$E[P(w_l, \mu_I)] = \int_0^{w_l} P(w, \mu_I) \frac{1}{w_l} dw \quad (9)$$

$$= 1 - \frac{1}{w_l} \int_0^{w_l} \int_{S_z}^{S_v} f(X_w) dX_w dw$$

이다. $[0 \sim w_l]$ 구간 동안의 부적합비용 $C_d(w_l, \mu_I)$ 은 구간에서의 제품 생산수와 부적합률의 기대값 그리고 부적합품 개당 비용의 곱으로, 아래 식 (10)과 같다. 생산 시작 시점에서 마모한계 w_l 시점까지 생산한 제품 수는 단위 마모당 제품 생산량 A 이므로 Aw_l 이다.

$$C_d(w_l, \mu_I) = Aw_l E[P(w_l, \mu_I)] D \quad (10)$$

$$= Aw_l \cdot D \left\{ 1 - \frac{1}{w_l} \int_0^{w_l} \int_{S_z}^{S_v} f(X_w) dX_w dw \right\}$$

위의 식에서 D 는 개별 부적합품의 처리비용이다.

3.3 품질비용

품질손실비용은 양품들 중에서 품질특성치 X_w 와 공정 목표값 m 과의 편차로 인해 발생하는 비용이다. 품질손실 함수에 대해서는 Boyles[3]가 제시한 <Figure 3>의 C_{pm} + 개념을 도입한다. 이 개념은 목표값 초과나 미달에 대해 상이한 비용계수를 설정하는 방식이다. k_1 은 품질특성치 X_w 가 목표값 m 에 미달할 때의 비용계수며, k_2 는 X_w 가 m 을 초과하는 경우의 비용계수다.

초기공정평균의 설정값이 μ_I 일 때, 마모수준 w 에서의 품질특성치 X_w 의 손실함수는 앞서의 식 (4)와 같다. 이때, 정규분포를 따르는 확률변수 X_w 에 대한 손실함수 $L(X_w, m)$ 의 기대값 $E[L(X_w, m)]$ 은 다음과 같다.

$$E[L(X_w, m)] = \quad (11)$$

$$\int_{S_z}^m k_1 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w, \quad (S_L \leq X_w \leq m)$$

$$\int_m^{S_v} k_2 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w, \quad (m \leq X_w \leq S_v)$$

$[0 \sim w_l]$ 구간 동안 생산한 Aw_l 개의 제품 중에서 양품들에 대한 품질비용 $C_q(w_l, \mu_I)$ 는 식 (12)와 같다.

$$C_q(w_l, \mu_I) = Aw_l \int_0^{w_l} E[L(X_w, m)] \frac{1}{w_l} dw \quad (12)$$

$$= A \int_0^{w_l} \int_{S_z}^m k_1 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w dw, \quad (S_L \leq X \leq m)$$

$$= A \int_0^{w_l} \int_m^{S_v} k_2 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w dw, \quad (S_L \leq X \leq m)$$

3.4 총비용 및 목적함수

$[0 \sim w_l]$ 구간에 대한 전체 총비용 $TC(w_l, \mu_I)$ 는 공정 평균 재설정 비용 G 와 식 (10)의 부적합비용 및 식 (12)의 품질비용의 합이다.

$$TC(w_l, \mu_I) = G + C_d(w_l, \mu_I) + C_q(w_l, \mu_I) \quad (13)$$

$$= G + Aw_l E[P(w_l, \mu_I)] D$$

$$+ Aw_l \int_0^{w_l} E[L(X_w, m)] \frac{1}{w_l} dw$$

본 연구에서의 목적은 마모한계 w_l 와 이 때의 초기공정평균 위치 μ_I 에 대한 단위 마모당 총비용의 최소화 문제다. 만일 목적식을 총비용함수로 설정하면, 총비용함수는 마모와 무관한 재조정비용과 마모 증가에 대해 단조 증가하는 두 가지 비용함수로 구성된다. 따라서 이 경우 목적함수는 마모에 대해 비용의 trade-off 관계가 발생하지 않는다. 그러므로 제품을 전혀 생산하지 않아 비용이 전혀 발생하지 않는 경우가 최적이 되어 모형이 성립되지 않는다. 목적식 $TC(w_l, \mu_I)/w_l$ 는 아래 식 (14)와 같다.

$$\text{Min } TC(w_l, \mu_I)/w_l, \text{ for } w_l \text{ and } \mu_I \quad (14)$$

$$TC(w_l, \mu_I)/w_l$$

$$= \frac{G}{w_l} + AE[P(w_l, \mu_I)] D + \frac{A}{w_l} \int_0^{w_l} E[L(X_w, m)] dw$$

$$= \frac{G}{w_l} + A \cdot D \left\{ 1 - \frac{A}{w_l} \int_0^{w_l} \int_{S_z}^{S_v} f(X_w) dX_w dw \right\}$$

$$+ \frac{A}{w_l} \int_0^{w_l} \int_{S_z}^m k_1 (X_w - m)^2 f(X_w) dX_w dw$$

$$\text{단, } f(X_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{\{X_w - (\mu_I + w)\}^2}{2(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)} \right]$$

목적식 $TC(w_l, \mu_I)/w_l$ 는 적분 불가능한 정규분포함수를 포함하는 이중적분의 형태이며, 규격 상하한을 기준으로 목적 함수가 달라지는 불연속함수이므로, 목적식이 w_l 와 μ_I 에 대해 대한 최소해가 존재함을 수리적으로 증명할 수 없다. 그러나 목적식을 구성하는 세 가지 비용함수의 성격을 개별적으로 해석함으로써 목적식이 단봉함수와 유사함을 설명할 수 있다.

단위 마모당 재조정 비용 G/w_l 는 $[0 \sim w_l]$ 의 구간에서 w_l 의 증가에 대한 단조감소함수다. 반면, 부적합률 $P(w, \mu_I)$ 에 대응하는 단위 마모당 부적합비용은 <Figure 4>에서와 같이 w_l 의 증가에 대한 단조증가함수다. 품질비용은

<Figure 3>에서와 같이 목표값 m 을 기준으로 아래로 볼록한 2차 함수다. 그러므로 모형의 목적식은 불연속 함수지만, 단조감소함수, 단조증가함수 그리고 2차 함수의 합으로 구성된다. 따라서 마모수준의 유의미한 구간 $[0 \leq w \leq (S_U - S_L)/2]$ 과 초기 공정평균 μ_I 의 유의미한 구간 $[S_L \leq \mu_I \leq m]$ 에서 목적식이 최소값을 취함을 직관적으로 알 수 있다.

본 연구에서는 예제를 통해 목적식의 전반적인 모습을 보이고, 해당 예제에 대한 최적 w_I 와 μ_I 을 제시한다.

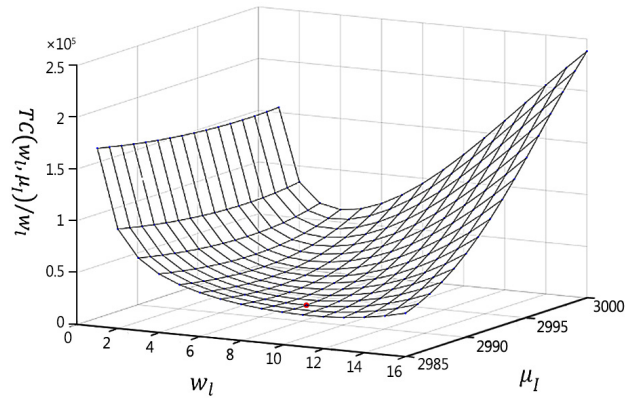
4. 수치 예제

예제는 선삭을 통해 봉형강 제품을 생산하는 공정이다. 설계상의 목표값 $m = 3,000\mu\text{m}$ 규격하한은 $S_L = 2,984\mu\text{m}$, 규격상한은 $S_U = 3,016\mu\text{m}$ 이다. 공정분산 함수와 관련한 매개변수들의 값은 초기 공정분산 $\sigma_0^2 = 25$, 척도모수 $\alpha = 3$, 형상모수 $\beta = 0.7$ 로 설정한다. 단위 마모당 제품 생산수 $A = 10$ 개다.

비용과 관련한 매개 변수들의 값으로, 재설정에 의한 보전비용 $G = 150,000$ 원/회이며, 1개의 부적합품으로 인한 처리비용은 상대적으로 보전비용에 비해 매우 작은 $D = 10,000$ 원/개로 설정했다.

품질함수와 관련한 비용계수에서는 좌우 편차를 달리 하여, $k_1 = 10$ 으로 $k_2 = 20$ 으로 설정했다. 이들 계수들도 마모수준과 초기 공정평균 μ_I 의 유의미한 구간에서 목적식의 변화를 보여줄 수 있는 범주에서 설정했다.

결정 변수 중 하나인 μ_I 는 공정 목표값과 규격하한 사



<Figure 6> $TC(w_I, \mu_I)/w_I$, for w_I and μ_I

이에서 의미가 있으므로, $[2,984\mu\text{m} \leq \mu_I \leq 3,000\mu\text{m}]$ 에 대해 목적식을 구했다. 조정 주기인 마모한계 w_I 에 대해서는 최초 마모 $1\mu\text{m}$ 에서부터 공차에 해당하는 $16\mu\text{m}$ 까지 조사했다. 예제의 계산은 수치해석 프로그램 중에서 MATLAB을 이용했으며, 두 결정변수 w_I 와 μ_I 에 대한 목적식의 결과를 반응표면함수 형태로 <Figure 6>에 보였다. 최적해 근처에서의 정확한 수치값 결과를 <Table 1>에 나타내었다.

<Figure 6>에서 마모한계를 늘려갈수록 목적식은 감소하다가 증가함을 확인할 수 있다. 모든 동일한 마모한계에서 초기공정평균 위치를 공정 목표값 $3,000\mu\text{m}$ 보다 낮은 값으로 설정할 때, 비용함수를 보다 줄일 수 있음도 확인할 수 있었다. 이 예제에서의 최적해는 $w_I = 10\mu\text{m}$, $\mu_I = 2,987\mu\text{m}$ 이며, 이 때 단위마모당 총비용은 30,543원으로 최소값이다.

<Table 1> $TC(w_I, \mu_I)/w_I$, for w_I and μ_I

	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2985	56,543	48,156	42,376	38,176	35,079	32,862	31,436	30,799	31,000	32,128	34,295
2986	54,174	45,923	40,313	36,332	33,515	31,658	30,690	30,625	31,530	33,504	36,667
2987	52,038	43,949	38,547	34,834	32,365	30,952	30,543	31,170	32,910	35,871	40,170
2988	50,152	42,259	37,114	33,735	31,696	30,827	31,096	32,547	35,265	39,356	44,928
2989	48,535	40,886	36,060	33,096	31,587	31,381	32,462	34,879	38,721	44,084	51,155
2990	47,215	39,871	35,444	32,993	32,131	32,723	34,760	38,294	43,405	50,169	58,642
2991	46,230	39,267	35,336	33,516	33,436	34,971	38,116	42,917	49,431	57,704	67,749
2992	45,623	39,136	35,817	34,763	35,613	38,248	42,654	48,859	56,890	66,748	78,395
2993	45,448	39,554	36,982	36,842	38,781	42,672	48,484	56,213	65,842	77,320	90,547
2994	45,769	40,601	38,927	39,864	43,053	48,350	55,693	65,033	76,301	89,383	104,000
2995	46,654	42,366	41,755	43,934	48,528	55,363	64,332	75,331	88,226	102,840	119,000
2996	48,179	44,937	45,559	49,142	55,281	63,757	74,405	87,056	101,510	117,510	135,000
2997	50,416	48,397	50,421	55,555	63,349	73,526	85,853	100,090	115,960	133,160	151,000
2998	53,434	52,813	56,394	63,199	72,717	84,601	98,546	114,240	131,340	149,480	168,000

기존 연구들과의 비교를 위해, 동일 예제에 대해 비용계수를 동일하게 처리하는 경우와 공정 계산이 마모와 무관한 상수로 처리하는 경우에 대해서도 목적식의 최적해를 구해 보았다.

$k_1 = k_2 = 10$ 으로 목표값 대비 양쪽 비용계수를 동일하게 설정한 경우, 최적해는 $w_l = 11\mu m$ 와 $\mu_l = 2,988\mu m$ 로 마모한계는 기존과 차이를 보였다. 그러나 움직임의 크기는 목표값 대비 좌우 비용계수의 상대적 크기에 따르게 때문에 예제 결과에 의미를 부여하기는 곤란하다. 두 번째로 $\alpha = 0$ 으로 설정하여 공정분산이 마모에 무관한 상수로 처리했을 때, 최적해는 $w_l = 14\mu m$ 이었다. 이 경우 공정분산이 마모수준과 무관하므로 부적합률의 증가가 기존 보다 상대적으로 작음으로 인해 조정한계는 길어지는 성질을 반영한 것임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구의 목적은 공정평균이동 문제에 대해 기존 연구들에서 별도 분야에서 접근했던 개념들을 통합하여 보다 실제 공정에 근접한 모형을 제시함에 있다.

이 연구에서 통합한 두 가지 개념은 손실함수에서 품질특성치의 좌우 편차에 따라 비용계수를 달리 하는 C_{pm} + 와 공정분산을 상수가 아닌 마모의 증가에 대한 함수로 처리한 것이다. 모형에서의 결정변수는 단위 마모당 총비용을 최소로 하는 초기공정평균과 공정조정이 필요한 마모한계다. 수치예제를 통해 모형의 전반적 형태와 최적해를 제시했다. 또한 비용계수를 동일하게 처리하거나 공정분산을 상수로 처리하는 경우의 예제를 추가로 제시하여 기존 연구와의 비교 결과를 제시했다.

추후 단위 마모당 생산 제품 수에 대해 분포함수를 적용하여 보다 더 현장 상황이 반영된 연구들이 이어질 수 있을 것이다.

Acknowledgement

This study has been supported by a research fund of Kumoh National Institute of Technology, Korea.

References

- [1] Ahn, G.H. and Jang J.S., Determination of Starting Value and the Resetting Time for a Production Process with Linear Shift in a Process Mean, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 1998, Vol. 26, No. 4, pp. 51-64.
- [2] Arcelus, F.J., Banerjee, P.K., and Chandra, R., Optimal Production Run for a Normally Distributed Quality Characteristics Exhibiting Non-Negative Shifts in Process Mean and Variance, *IIE Transactions*, 1982, Vol. 14, No. 2, pp. 90-98.
- [3] Boyles, R.A., The Taguchi Capability Index, *Journal of Quality Technology*, 1991, Vol. 23, No. 1, pp. 17-26.
- [4] Chen, C.H., Determining the optimum process mean based on Asymmetric Quality Loss Function and Rectifying Inspection Plan, *IEEE : Industrial Engineering Management Conference*, 2004, pp. 1080-1084.
- [5] Gibra, I.N., Optimal Control Processes Subject to Linear Trends, *The Journal of Industrial Engineering*, 1967, Vol. 18, No. 1, pp. 35-41.
- [6] Golhar, D.Y., Determination of the Best Mean Contents for a Canning problem, *Journal of Quality Technology*, 1987, Vol. 19, pp. 82-84.
- [7] Juran, J.M., *Quality Handbook*, McGraw-Hill Companies, Inc., 1962.
- [8] Kamat, S.J., A Smoothed Bayes Control of a Variable Quality Characteristic with Linear Shift, *Journal of Quality Technology*, 1976, Vol. 8, No. 2, pp. 98-104.
- [9] Lee, D.K., Determination of The Retting time to the Process Mean Shift by the Loss Function, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 1, pp. 165-172.
- [10] Lee, J.H., Park T.H., Kwon H.M., Hong S.H., and Lee M.K., Optimum target values for manufacturing processes when drifting rate in the process mean is normally distributed, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 2010, Vol. 38, No. 4, pp. 98-104.
- [11] Lee, M.K. and Bai D.S., Determination of the Optimal Target Values for a Canning Process with Linear Shift in the Mean, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 1994, Vol. 20, No. 1, pp. 3-13.
- [12] Makis, V., Optimal tool replacement with asymmetric quadratic loss, *IIIE Transaction*, 1996, Vol. 28, No. 6, pp. 463-466.
- [13] Manuele, J., Control Chart for Determining Tool Wear, *Industrial Quality Control*, 1945, Vol. 1, No. 6, pp. 7-10.
- [14] Pandit, S.M. and Wu, S.M., *Time Series and System Analysis with Applications*, John Wiley & Sons, 1983, pp. 307, 490-491.
- [15] Park, D.K., Lee, J.S. and Jo, G.H., A Study on the Wearing Analysis of Insert Tip and Chip's Shape in

- Turning Operations, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 2015, Vol. 16, No. 4, pp. 2430-2435.
- [16] Quesenberry, C.P., A SPG Approach to Compensating a Tool-Wear Process, *Journal of Quality Technology*, 1988, Vol. 20, No. 4, pp. 220-229.
- [17] Rahim, M.A. and Tuffaha F., Integrated Model for Determining the Optimal Initial Settings of the Process Mean and the Optimal Production Run Assuming Quadratic Loss Functions, *International Journal of Production Research*, 2004, Vol. 42, No. 16, pp. 3281-3300.
- [18] Schneider, H., Colm O'Conneide, and Tang, K., Optimal Production Process Subject to AOQL Constraint, *Naval Research Logistics Quarterly*, 1988, Vol. 35, No. 3, pp. 383-396.
- [19] Springer, C.H., A Method for Determining the Most Economic Position of a Process Mean, *Industrial Quality Control*, 1951, Vol. 8, pp. 36-39.
- [20] Sule, D.R. and Harmon, B., Determination of Coordinated Maintenance Scheduling Frequencies for a Group of Machines, *AIEE Transactions*, 1979, Vol. 11, No. 1, pp. 540-548.

ORCIDDo-Kyung Lee | <http://orcid.org/0000-0003-3255-0261>